心理科学进展 2022, Vol. 30, No. 9, 2020–2033
Advances in Psychological Science

https://doi.org/10.3724/SP.J.1042.2022.02020

唤醒定义探析及其认知神经生理基础*

邹 迪 李 红 王福顺

(四川师范大学脑与心理科学研究院，成都 610066)

摘 要 唤醒是衡量机体清醒程度和做出反应前准备程度的指标，其水平可从睡眠到觉醒的连续体上变化，具有独特的生理机制与神经回路。由于唤醒与情绪关联密切，唤醒度这个概念常被认为等同于情绪强度，但情绪强度实际上是唤醒和效价的和向量。受到Lazarus提出的“刺激”定义情绪思想的启发，对唤醒的内含和心理机制进行了探析，发现对不符合预期刺激出现的紧急准备是唤醒系统的主要功能，预期性相关机制是唤醒的重要认知加工机制。其它因素(刺激属性、个体差异等)可能存在以下影响唤醒的原因：改变处理刺激时所需的资源量、影响预期机制。未来研究可从心理唤醒与生理唤醒的关系、唤醒的测量方法、唤醒度与情绪强度的关系、人类临床精神疾病的唤醒特征等角度推动唤醒的基础和应用研究。

关键词 唤醒，预期性，认知机制，睡眠，觉醒，情绪强度

分类号 B845

1 引言

唤醒(Arousal)衡量了生物体的清醒程度，对生物体的生存和繁衍至关重要(Satpute et al., 2019; 王福顺等, 2018)。唤醒是心理学一直探索和感兴趣的主题，其在心理学及相关领域的应用十分广泛。唤醒与重度抑郁症(Olbrich et al., 2016)、双相情感障碍(Levy, 2013)、创伤后应激障碍(王慧颖等, 2011)、注意缺陷障碍(Bellato et al., 2020)等众多精神疾病相关，已被NIMH (美国国立精神卫生研究所)列为重点研究领域之一(Olbrich et al., 2016)。另外，鉴于唤醒与情绪关联密切，其为情绪的测量与量化提供了一种指导和途径。众多研究通过唤醒为桥梁来探索情绪与认知、人格等其它心理成分之间的关系(乐国安，董颖红，2013)，同时标准化情绪刺激材料系统，例如，国际情绪图片库(IAPS) (Bradley & Lang, 2017)、中国情绪图片库(白露等, 2005)等的开发与编制均要考虑唤醒。

然而，一些研究将唤醒本初的含义忽略，直接简单地把其与情绪连接起来，即认为唤醒度(唤醒水平的度量)即为情绪强度(Greco et al., 2017; Iordan & Dolcos, 2015; Turkington et al., 2019)。虽然唤醒度与情绪的强度在某些情况下可能存在正相关关系，但是唤醒与情绪却并不能完全等同。例如，“压抑”虽然是一种低唤醒的情绪，但其情绪体验却很强烈(乐国安，董颖红，2013)；“口哨声”可能不会引起个体强烈的情绪体验，却能诱发较高的唤醒。因此，总结与分析唤醒定义，厘清唤醒与情绪强度的区别与联系，对未来情绪相关研究具有重要价值。此外，进一步深入探究“唤醒”这一核心概念本身所具有的含义及机制，对当前研究中唤醒度的使用具有重要意义。

综上所述，本文首先对“唤醒”的概念及其与情绪的关系进行总结分析，并在受到“刺激定义情绪” (Lazarus, 1999)客观思想的启发上，进一步对“唤醒”这一核心概念进行深入探究；其次，通过回顾唤醒的相关测量方法，从认知机制视角对“唤醒”进行详细阐述；然后，结合相关研究进一步整合“唤醒”涉及到的神经生理机制；最后，根据当前研究的现状与不足，对亟待解决的问题进行展望。

2 唤醒的定义探析

2.1 唤醒定义

唤醒(Arousal)最早来源于Cannon (1914)，他

收稿日期：2021-06-29
* 教育部人文社科基金项目(19YJAZH083)资助。
通信作者：王福顺, E-mail: 13814541138@163.com

认为唤醒是肾上腺髓质和交感神经系统的结合，并将唤醒的概念定义为：“当个体面对突发事件时，调动身体力量来进行斗争的动员器”。随后，Duffy (1957)认为机体是一种能量系统，该系统可以通过调动能力、注意力以及努力等资源来进行信息的搜集，从而使个体做出身体或行为上的反应，唤醒则指的是这种资源调动的准备状态。故唤醒最初是机体进行资源调动的调动器，并反映了机体对外界刺激输入时的准备增强(Whalen et al., 1994; Posner et al., 2009)。

随着研究者将唤醒引入情绪维度，使得唤醒的内涵有了一定的发展与变化。Wundt (1897)最先对情绪的维度进行探究，提出了情绪的三维学说；Schlosberg (1952)也提出了一个包含愉快−不愉快和紧张−放松的情绪环形表征，并在此基础上提出了情绪的第三个维度：兴奋−平静(Schlosberg, 1954)。后来，研究者逐渐发现紧张−放松，兴奋−平静两个维度实际上是重叠的。据此，Russell (1980)等人整合了前人的观点，进一步提出了著名的环形模型(circumplex)，即情绪二维理论。该理论否认了先前占主导地位的基本情绪理论所认为的情绪是离散的、由有限几个基本情绪组成的观点(Vetter et al., 2018)，认为情绪是连续的、可以相互转化的，且情绪最好用带有直角坐标系的圆环来表示，圆环的横轴是效价(Valence)维度，纵轴是唤醒维度，效价和唤醒两个维度是所有情绪的基本属性，亦称作核心情绪(Core Affect) (Russell, 1980)。效价被表示为从愉悦−不愉悦的连续体，反映了个体的接近−回避的行为(Gu et al., 2019)。而此时的唤醒被认为衡量了机体的清醒程度，唤醒水平(唤醒度)则在从睡眠、困倦、放松、警觉、亢奋最后到激动的连续体上变化(Barrett & Russell, 1999)。Razmjou (1996)进一步指出唤醒代表了从睡眠到觉醒的连续体上中枢神经系统的活动状态。随着研究深入，研究者将唤醒度与人类的精神障碍连接起来，认为放松、平静处于唤醒轴的中央，白天过度嗜睡、镇静、注意力不集中处于低唤醒状态，失眠、恐惧、恐慌甚至精神病处于过度唤醒状态(Ross & van Bockstaele, 2021)。

在进行唤醒的相关研究时，有研究者将唤醒分解为三层含义，分别是：清醒唤醒(Wakefulness arousal)，代表唤醒的中枢神经系统状态(Siegel, 2004)；自主唤醒(Autonomic arousal)代表唤醒的外周神经生理反应(Lacey, 1956)；同时唤醒也能被个体所主观体验到(Barrett & Bliss-Moreau, 2009)，例如，人们有时会因不能平静、心率加快、血压升高而感到心烦意乱(Wilson-Mendenhall et al., 2013)，故第三层含义情绪唤醒(Emotional arousal)指的是个体的主观唤醒体验，通过个体的自主报告来测量(Lang et al., 1998)。然而，鉴于近年来唤醒的应用越来越广泛，研究者迫切需要一个对唤醒的统一定义。Satpute 等(2019)通过比较发现三种唤醒在神经基础上具有大量重叠，Saper (2002)甚至认为，不同唤醒的神经回路之间的整合几乎在中枢神经系统的各个层次中均可被发现。尽管已有研究发现三种唤醒生理机制的大量重叠有助于建立一个整体的唤醒架构，但是，将唤醒的含义进行分解开来最初可能就是欠妥当的。研究者在讨论情绪唤醒与觉醒唤醒之间生理机制的重叠程度时，实际上是将引起某些具有高唤醒特征的情绪反应(例如，疼痛、恐惧)的生理机制与觉醒的生理机制作比较(Satpute et al., 2019)，而脱离了唤醒本身来进行讨论。事实上，Russell (2003)最早就给了唤醒一个较为全面的定义，认为其是一种中枢神经系统的状态，这种状态可以被个体体验为主观的感觉，同时与自主神经系统的活动密切相关。此外，近年来的研究表明，情绪的生理反应与主观体验之间相互影响，难以分割，中枢神经系统的表征影响甚至有可能决定了情绪的主观体验(Pace-Schott et al., 2019)。

综上可知，唤醒最初是机体进行资源调动的调动器以及从事件发生后到做出反应前机体准备程度的指标。随着其被引入情绪维度，唤醒被当作情绪的核心特征之一，用来衡量机体的清醒程度，其水平在从睡眠到觉醒的连续体上变化。同时，唤醒可以被个体主观体验到，且具有独特的神经系统，其概念应当是一个既包含心理唤醒，又包含生理唤醒的整体。

2.2 唤醒与情绪的关系

唤醒的本身含义往往被直接忽略，在实际研究中，常常将唤醒度与情绪的强度等同起来。究其原因可能是一些研究者将效价视为情绪方向，并且认为效价只具有方向没有大小。这忽略了效价本身所具有的含义及其连续特性，使得情绪维度的横坐标没有了大小刻度；进而导致了对效价和唤醒度分别只是情绪的方向和大小的替代词的

误解(Akhtar et al., 2019; Hadinejad et al., 2019)。例如，Preoţiuc-Pietro 等(2016)通过对 2895 个社交媒体帖子的数据集进行效价和唤醒的评分，从而预测社交媒体文本中的情绪状态信息，以效价和唤醒度定义了一个完善的描述情绪状态的系统。然而，该研究却简单地将效价视为情绪的方向，且将唤醒度当作情绪的强度，忽略了唤醒与效价本身的含义，导致该研究可能并没有模拟到一个完善的情绪状态。事实上，Barrett 和 Russell (1999)很早就指出，“效价”只是情绪的一个特征，被表示为从不愉悦–愉悦的连续体，其本身并不是情绪。实际上，效价也具有不同的强度，即愉悦或者不愉悦的程度，且效价强度也会对情绪的强度产生影响(Posner et al., 2005)。更多的研究发现，效价和唤醒都是情绪强度的两个重要因子(Espuny et al., 2018)。例如，Jackson 等(2019)的研究证实了情绪同时受到效价和唤醒的影响，且即使是在不同文化中，各种情绪均可依据效价和唤醒来进行区分。此外，许多研究表明效价和唤醒度两者之间应该是相互独立的。Kuppens 等(2017)最近的研究结果表明效价与唤醒之间并不总是呈线性关系，且任何一种效价和唤醒的关系都是有可能的，一些个体在感受到很高的积极或消极效价的同时也有可能会感受到很低的唤醒。

综上可知，唤醒度与效价强度两者之间是相互独立的，且都会对情绪强度产生影响，故并不能简单地将情绪强度与唤醒度等同起来。而情绪的强度则可在情绪维度的坐标中使用效价和唤醒的“和向量”表示出来，也即情绪的强度应为该点离开坐标原点的距离(如图 1 所示)。

2.3 “刺激定义情绪”：唤醒概念的延伸

先前对情绪存在着一种循环定义的模式，即常用情绪强度来定义唤醒和效价，再反过来以唤醒和效价来定义情绪强度。通过对当前研究中存在的唤醒度与情绪强度概念混淆的问题进行梳理之后，发现使用“刺激定义情绪”可更清晰地区分出唤醒、效价以及情绪强度的含义，通过刺激物的特点来定义唤醒和效价，再使用唤醒和效价来表示情绪强度，便能跳出先前的循环定义模式。更为关键的是，“刺激定义情绪”的思想或许能对更加深入地理解唤醒的含义及其加工机制产生启发。

情绪的认知学说代表人 Lazarus 提出情绪都是由“外界事物”所诱发的，如果离开了具体的刺激事件，情绪就没有任何意义(Lazarus, 1999)。Russell (2003)认为核心情绪可以归因于“刺激”，这里的“刺激”可以来自于内心想象的、也可以是个体的精神状态所对应的人、状态、事物或者事件。因此，人类复杂多样的情绪都来自于一个客观的对象或者刺激事件，即“刺激”定义情绪。Lindquist 等(2013)也认为情绪必须与具体的“刺激事件”相关才具有心理意义。Barrett 等(2007)同样认为情绪是对事物的感知。Ekman (1992)的评价理论认为，情绪指向的刺激事件都具有两个特征，是否满足需要和是否预期出现。采用“刺激”定义情绪的思想，将刺激事件的特征与情绪的特征对应起来，可以得到是否满足需要决定了个体“喜欢–不喜欢”，对应了效价维度，而是否预期出现则代表了唤醒维度(Zheng et al., 2016)。采用对刺激事件的“喜欢–不喜欢”来界定效价维度，或许比使用“愉悦–不愉悦”这种“情绪”来定义情绪更加清楚客观，且更不容易将效价的含义混淆为情绪本身(Wang et al., 2020)。

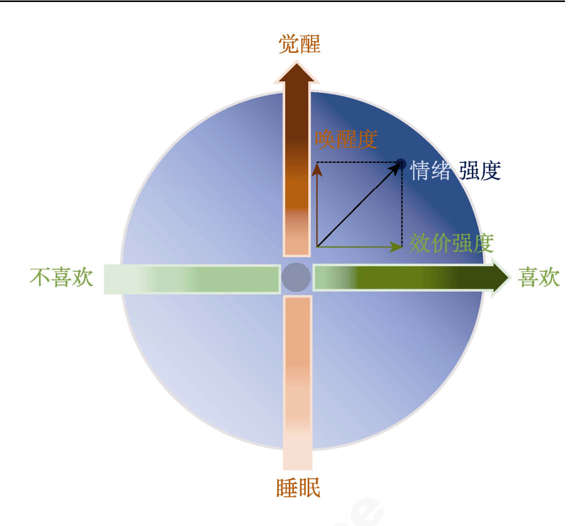


图 1 情绪的两个特征：效价(喜欢–不喜欢)，唤醒度(睡眠–觉醒)。刺激事物诱发的多种多样的情绪都可以由坐标平面中的点来表示，情绪强度可以定义为该点处效价和唤醒度的矢量相加，也即该点离开原点的距离。因此，不能直接将情绪强度等同于唤醒度。

在此基础上，通过对唤醒和预期二者含义的结合分析发现，唤醒与预期性确实存在某种内在联系。数学家基于信息论的原理，认为一件事件在发生前后，个体的目的就是要尽可能地降低信息熵(information entropy)，即搜集信息并调动资

源以对该事件有更多地认识(Sekoguchi et al., 2019)。而每一种刺激事件的出现必然伴随着在多大程度上符合或者不符合个体的预期(Gu et al., 2019), 不符合预期的程度决定了当前的信息搜集和资源调动量, 非预期也在信息论中被量化为"信息增益" (Information gain) (Sekoguchi et al., 2019)。如前所述, 唤醒是机体调动资源的调动器, 反映了机体做出反应前准备程度的指标(Posner et al., 2009)。因此, 从非预期的事件出现到在数学上能够被客观建模为"信息增益", 这中间的心理过程是通过唤醒来完成的; 即唤醒是对刺激事件出现不符合预期的紧急准备系统, 以此来快速调动相应资源并迅速做出反应。刺激的出现不可预期的程度越大, 表明先前对该刺激准备程度越少, 刺激出现后个体当前需要调动的资源就越多, 唤醒水平也就越高。故预期性机制是唤醒重要的认知加工机制。

3　唤醒的认知机制

在一些决策研究中, 通过对唤醒与非预期的量化与测量, 表明了不可预期的刺激确能显著地引起唤醒水平的变化(van Slooten et al., 2018)。因此, 在对"非预期"与唤醒的量化及测量方法进行阐述的基础上, 回顾了"非预期"及其机制对唤醒影响的相关研究, 并进一步对影响唤醒的其它因素进行讨论。

3.1　"非预期"及唤醒度的量化与测量

实际研究中常使用"惊讶"或"预测错误"来对非预期进行量化。"惊讶"一词被用来描述偏离个体期望的程度(Peters et al., 2017); 而预测错误则指的是实际得到的奖赏或惩罚与预期得到的之间的偏差(Preuschoff et al., 2011)。一般认为, 较罕见的刺激或者违反序列的刺激——即"概率效应"会引起较大的惊讶, 且该方法被认为符合惊讶的直观概念(Kamp & Donchin, 2015)。因此, "概率效应"是捕捉惊讶的有效方法。例如, Alamia 等(2019)通过马尔科夫规则来设定罕见刺激, 具体为由 4 个字母构成的字母顺序表一秒钟转换一次, 大部分的字母被转换的概率为 47.5%, 只有一个字母仅有 5%的概率能够被转换, 即设定的罕见刺激, 同时记录罕见刺激转换时被试的唤醒水平, 从而能够在客观水平上对唤醒度和非预期之间的关系进行探讨。Liao 等(2016)则是通过在正常的声音序列中插入噪声和高频的声音来设定罕见刺激。另外, 也有研究利用赌博范式来对预测错误进行捕捉, 从而来量化非预期(Preuschoff et al., 2011)。

研究中对唤醒的测量主要包括了主观报告和自主神经系统测量法。自主报告法直接反映了个体主观的唤醒水平, 可以通过对平静–激动的程度, 即觉醒的程度进行评分来衡量个体当前的唤醒程度。实际研究中为了更加形象地表示唤醒的含义, 也会采用"自我评估模型" (The Self-Assessment Manikin, SAM), 该模型设置了从昏昏欲睡到觉醒形象的五个小人(Bradley & Lang, 1994)。被试可以在 5 个小人中的任意一个或者其中两个小人之间打上'×', 形成 9 点评分, 代表自己当前的唤醒程度。SAM 是一种廉价、简单的方法, 可以在很多情况下快速获取情绪反应, 并且其结果与生理指标(如心率)也具有一定的关联(Bradley & Lang, 2017)。

自主神经测量唤醒的原理在于自主神经系统(Autonomic nervous system, ANS)是唤醒的重要组成部分。因此, ANS 的活动状态也能够反映唤醒水平。ANS 包含交感神经(Sympathetic nervous system, SNS)和副交感神经系统(Parasympathetic nervous system, PNS) (Pace-Schott et al., 2019)。其中, SNS 的激活与情绪的唤醒维度呈正相关(Bradley et al., 2010; Mathôt, 2018)。而 PNS 与 SNS 相互之间施加的对立力量, 主要负责休息和恢复, 使躯体保持一种平静的状态, 即 PNS 激活的降低代表唤醒的增强(Bellato et al., 2020)。研究中常采用衡量 SNS 激活的重要指标: 心率(HR)、皮肤电导水平(SCL)以及瞳孔扩张反应(PDR)等来反映被试的唤醒水平(Bradley et al., 2010; Mathôt, 2018)。除此之外, 心率变异性(HRV)反映了 PNS 的激活水平, HRV 较高的个体具有良好的环境适应能力, 同时也能够在一定程度上衡量个体的唤醒水平(Weissman et al., 2018)。

3.2　"非预期"刺激对唤醒的影响

如前所述, 预期性可能是唤醒主要的认知机制。确有研究表明, "非预期"刺激能够引起唤醒水平的显著增强(van Slooten et al., 2018; Zhao et al., 2019)。例如, 采用听觉 oddball 范式的实验研究报告了异常刺激会显著引起瞳孔扩张反应(Kamp & Donchin, 2015; Liao et al., 2016)。Lavín 等(2014)的研究结果同样表明了在面对令人惊讶的刺激时,

唤醒水平会显著升高，而其增强与奖赏无关。最近的一项研究表明在意外的发动机故障期间，飞行员的心率和瞳孔扩张都显著增加(Kinney & O'Hare, 2020)。另外, Alamia 等(2019)的研究结果表明，即使是在无意识的情况下，罕见刺激也能够诱发较高的唤醒水平，并且该实验通过要求被试报告与罕见刺激无关的其它目标刺激，在保证被试注意力集中在实验任务上的同时，也排除了与任务有关和决策奖赏等因素可能导致的唤醒变化。

3.3 预期性相关机制对唤醒的影响

3.3.1 不确定性

不确定性是指人们利用先前的经验以及一些不完整的信息来对未来的事件进行主观的概率推断，即出现的刺激是预测奖赏还是威胁的可能性(Yu & Dayan, 2005)。研究表明，刺激的不确定性也会对唤醒产生影响(Urai et al., 2017)。但是，这种不确定性可能并不会影响唤醒本身，而是通过影响“非预期”从而影响唤醒。人的“预期”并不是完全客观的，个体会根据先前的经验和推断，即不确定性来调整自己的预期，形成“主观预期”。而当结果与主观预期不匹配时，“主观非预期”就出现了，如果个体预期的程度越高，或者说对自己的推断越确定，当结果违反主观预期时，非预期的程度也就越强。Preuschoff 等(2011)的研究结果表明，不确定性并不会影响唤醒本身，而是判断不确定时的错误，即主观非预期导致了唤醒水平的显著增强，低不确定性会导致主观非预期的增强，从而显著增强唤醒水平。最近的一项研究结果同样表明，在高信心水平之后所出现的主观非预期会显著地引起瞳孔扩张反应，并且显著大于在低信心水平的条件下所诱发的反应，因此，个体的信心水平对于驱动主观非预期之后的唤醒具有十分重要的意义(de Gee et al., 2021)。

3.3.2 习惯化

习惯化是指个体对反复出现刺激的反应减弱(Lévy et al., 2006)，其也能对唤醒产生显著影响。例如，法医和普通人看见尸体时的唤醒反应有所不同。研究表明，当呈现新异刺激时，婴儿的瞳孔扩张反应显著增强，而当呈现熟悉刺激时，该效应逐渐下降(Jackson & Sirois, 2009)。Zukerman 等(2019)的研究同样表明当新异刺激反复呈现时，PTSD 患者对该刺激的习惯化程度与觉醒水平呈负相关。事实上，习惯化也是预期的形成机制之一。数学家基于信息论的原理将习惯化量化为信息增益的减少，也就是说习惯化代表着个体预期的不断增强(Sekoguchi et al., 2019)。另外，研究表明，习惯化还与不确定性相互作用影响预期，相比起低不确定性，在高不确定性的情况下，习惯化能引起更大的预期增强效果(Ueda et al., 2021)。

3.4 其它因素对唤醒的影响

除了预期性的形成机制——不确定性以及习惯化以外，其它刺激也会对唤醒产生一定影响。例如，Maier 等(2019)最近的研究表明，当刺激以非预期的方式呈现时，相比起不重要的刺激，重要的刺激能引起更高的唤醒水平。刺激的重要性等属性之所以能引起唤醒的增强，可能存在以下两个原因。首先，根据认知资源理论，每一种刺激所分到的资源有所不同，个体需要分配更多资源到较为重要的刺激上(Shenhav et al., 2017)，即刺激的重要属性扩大了处理该刺激所需的资源量，故相应地，刺激出现后个体当前需要调动的资源量(唤醒水平)也会随之增多。其次，重要刺激的出现也必定伴随着多大程度上符合或不符合个体的预期，刺激的重要属性可能同时会对预期性及其相关机制产生影响。研究表明个体会对重要的事件进行更谨慎的反应(Cavanagh et al., 2014)，具有更长的反应时和更高的正确率(Murphy et al., 2016)，说明了个体会对该类刺激产生更高的确定性，这也就意味着当重要事件以意外的方式出现时，相较于不重要刺激，诱发了个体更高的主观非预期。此外，刺激的重要性及意义也会影响习惯化，面对越重要的刺激时，个体越难以习惯，进而产生了更高的唤醒(Barry, 2004; Bradley, 2009)。

另外，个体差异或者个体态度也会在一定程度上对唤醒产生影响。研究表明，当非预期刺激出现时，相较于具有冒险精神的个体，相对保守的个体产生了更高的唤醒反应(de Gee et al., 2014)。同理，其可能是对相同刺激所分配的资源量存在个体差异，以及个体的差异和个体态度也能显著地影响不确定性等预期性的形成机制(Yu & Dayan, 2005)。

综上所述，研究表明 “非预期”刺激确能引起唤醒水平的显著增强，预期及其相关机制——不确定性、习惯化等均能引起唤醒反应的改变，故预期性可能是唤醒的重要认知机制。此外，刺激的属性(例如，重要性)以及个体差异也会影响唤

醒，是由于这些因素改变了个体处理刺激时所需的资源量，故相应地，刺激出现后个体当前所需调动的资源量(唤醒水平)也会随之改变；另一方面，这些因素也可能对个体的预期程度产生了影响。

4　唤醒的神经机制

4.1　促进唤醒的皮层下结构及神经回路

促进唤醒的皮层下回路主要涉及从脑干(Brainstem)和尾部下丘脑(Caudal Hypothalamus)到丘脑(Thalamus)的背侧通路或者从脑干和尾部下丘脑连接到下丘脑(Hypothalamus)的腹侧通路，背侧通路与唤醒状态下的意识内容有关，而腹侧通路则对于唤醒的行为状态至关重要，因此，正常的唤醒需要具备腹侧和背侧两个通路(Scammell et al., 2017)。其中，脑干和尾部下丘脑中的促进唤醒信号主要来源于一些富含单胺类神经元和胆碱能神经元的区域。另外，基底前脑(Basal Forebrain, BF)中也含有大量的胆碱能神经元，其能够直接投射到丘脑，进而促进唤醒水平。

4.1.1　单胺类神经元及其区域

脑干中的一些单胺能神经元对于促进唤醒水平至关重要。蓝斑(locus coeruleus, LC)是位于第四脑室旁脑干侧壁的一个小细胞核，是脑内去甲肾上腺素(norepinephrine, NE)合成的主要场所(Mäki-Marttunen et al., 2020)。LC-NE 系统长期以来被认为是中枢应激反应的关键中介，能够促进觉醒(McCall et al., 2015)。与 LC 相似，中缝背核(Dorsal raphe nuclei, DRN)中的五羟色胺(5-HT)神经元也与觉醒有关(McGinty & Harper, 1976 ;Cazettes et al., 2021)。5-HT 能够直接刺激其它促进觉醒的神经元，并且增强 5-HT 作用效果的药物通常会增加人类和啮齿动物的觉醒度(Liu & Dan, 2019)。此外，腹侧被盖区(Ventral tegmental area, VTA)的多巴胺(Dopaminergic, DA)神经元同样能够强烈地促进唤醒，尤其是在高动机的条件下，而多巴胺的拮抗剂，如抗精神病剂，则具有镇静的效果(Scammell et al., 2017)。Menegas 等(2017)的研究表明，与脑干相连的尾部纹状体(Tail of striatum, TS)的多巴胺神经元优先接收来自唤醒区域的信号，而其激活与奖赏无关。

除了上述一些脑干中的区域以外，位于下丘脑尾部的下丘脑结节乳头核(Tuberomammillary nucleus, TMN)内的组胺能(histaminergic)神经元也是控制唤醒的关键节点。TMN 是大脑中组胺神经元的唯一来源，组胺能神经元能直接刺激丘脑和其它觉醒促进区域(Scammell et al., 2017)。

4.1.2　胆碱能神经元及其区域

富含胆碱能(cholinergic)神经元的区域主要包括 BF 以及脑干中的脑桥脚(pedunculopontine, PPT)和外侧被盖核(Laterodorsal Tegmental Nuclei, LDT) (Scammell et al., 2017)。

BF 对于觉醒水平的促进具有重要作用，其严重损伤甚至会造成昏迷(Buzsaki et al., 1988)，原因在于 BF 中含大量的胆碱能神经元，而该神经元很早就被认为是唤醒系统的一部分(Steriade, 1996; Xu et al., 2015)。研究发现，除了在促进唤醒中扮演主要作用的胆碱能以外，GABA 能和谷氨酸能神经元在 BF 中也有少量分布，且它们都能够不同程度地促进觉醒状态(Anaclet et al., 2015)。另外，位于脑桥和中脑连接处的 LDT 和 PPT 中也含有一定数量的胆碱能神经元，与 BF 类似的是，这些核团中也包含了不同种群的 GABA 能神经元和谷氨酸神经元 (Wang & Morales, 2009)。

除了这些主要含有胆碱能神经元的区域以外，臂旁核(Parabrachial, PB)也是一个对促进觉醒起着重要作用的区域(Adamantidis et al., 2007)。PB 位于脑桥吻端的背外侧部分，内侧 PB 中的谷氨酸能神经元投射到基底前脑，对促进啮齿动物的觉醒十分关键。外侧 PB 则参与了由高碳酸血症(hypercarbia)引起的唤醒增强(Liu & Dan, 2019)。

4.2　抑制唤醒的皮层下结构及神经回路

下丘脑视前区(Preoptic area, POA)、外侧下丘脑(Lateral hypothalamus, LH)、黑质下网状部分(substantia nigra pars reticulata, SNr)以及中脑导水管周围黑质中(periaqueductal gray, PAG)的 GABA 能神经元能够起到抑制唤醒，促进睡眠的作用。

POA 一直被认为是重要的睡眠中心(Nauta, 1946 ; Liu & Dan, 2019)，其能够强烈地抑制促进唤醒的 TMN 的活性，研究表明，在该区富含具有抑制唤醒活性的 GABA 能神经元(Gong et al., 2004)。另外，在下丘脑的其它区域中也发现了该神经元。例如，在 LH 中，GABA 能神经元的光遗传激活所表达的黑色素浓缩激素(Melanin concentrating hormone, MCH)强烈地抑制唤醒水平，并促进了快速眼动睡眠和非快速眼动睡眠(Konadhode et al., 2013; Tsunematsu et al., 2014)。SNr 中的 GABA 能

神经元通过对多巴胺神经元的抑制，能够达到抑制唤醒的效果，最终导致睡眠(Liu & Dan, 2019)。最近的研究表明，PAG 中的 GABA 能神经元通过抑制 DRN 中的 5-HT 以及 LC 中的 NE，也能起到促进非快速眼动睡眠的作用(Liu & Dan, 2019; Weber et al., 2018)。

4.3 唤醒的皮层环路

唤醒的中枢神经加工机制主要涉及一条起源于脑干，并投射到丘脑、下丘脑以及大脑皮层的“自下而上”的通路。其中，默认模式网络(Default mode network, DMN)和突显网络(Salience network, SN)中的一些关键皮质节点及它们之间的相互连接参与了唤醒水平的加工。

SN 主要包含前脑岛(Anterior insula, AI)和前扣带回(anterior cingulate cortex, ACC) (Schiel et al., 2020)。ACC 是唤醒系统的一部分，在高唤醒水平的个体中，能够观察到它的持续参与(Wassing et al., 2019)。AI 也与过度觉醒密切相关。例如，Koenigs 等(2010)的研究结果表明，AI 的受损导致了退伍军人的失眠症状。此外，SN 内部更强的功能连接性显著地预测更高的觉醒度(Xia et al., 2017)，且 SN 还与丘脑和脑干等皮层下唤醒系统具有功能连接(Lee et al., 2018)。

DMN 是一个被认为与自我冥想过程相关的脑网络，主要包含后扣带回、顶下叶、腹内侧前额叶皮层、楔前叶以及海马体(Schiel et al., 2020)。Regen 等(2016)在基于海马为种子区域的探索性功能连接分析中发现，在过度唤醒的情况下，海马与 DMN 其它区域之间的功能连接增强；Tagliazucchi 等(2013)的研究也表明，在人类睡眠期间，DMN 各节点之间的功能连接降低。另外，DMN 与丘脑也具有功能连接。Picchioni 等(2014)的研究结果表明，在昏迷和全身麻醉患者中能够观察到后扣带回、楔前叶与丘脑的功能连接下降；Stitt 等(2018)的研究发现了丘脑与顶叶的相互作用与唤醒水平密切相关，在低唤醒情况下，可以观察到丘脑与顶叶相互作用产生的 α 振荡，而在高唤醒中，能够观察到 θ 同步振荡反应。除此之外，DMN 还与脑干、中缝背核等唤醒系统的重要组成部分具有紧密连接(Bär et al., 2016)。

4.4 非预期性的脑机制及其与唤醒的重叠

SN 网络对于非预期性信号的加工具有关键作用。研究表明 SN 网络中的 ACC 和 AI 区域都能够被非预期性和惊讶刺激强烈地激活(Carter et al., 1998; Gabitov et al., 2020); Hayden 等(2011)的研究结果同样表明了当面对令人惊讶的刺激时，猕猴的 ACC 区域被强烈激活。最近一项使用任务态 FMRI 的研究发现，当面对非预期刺激时，AI 首先对该信号进行接收并将其传输到 ACC，ACC 会进一步将该信号向额顶叶网络(FPN)和 DMN 的一些节点传送(Visalli et al., 2019)。

此外，VTA 中的多巴胺神经元、BF 中的胆碱能神经元、LC 中的 NE 以及杏仁核都被认为涉及非预期和惊讶信号的加工。Schultz 等(1997)使用活体记录发现，VTA 中的多巴胺神经元对于食物奖励没有太多反应，只有当奖赏与非预期刺激同时出现时，多巴胺神经元才开始放电。Menegas 等(2018)的研究同样表明，VTA 中的多巴胺神经元能够编码刺激的非预期性。新异刺激和非预期刺激还能够激活 BF 中的胆碱能和 LC 中的 NE 神经元(Aston-Jones & Cohen, 2005)；同时有研究表明，LC (Joshi et al., 2016)和 BF (Weible et al., 2007)与 ACC 具有功能连接。非预期的脑机制还涉及杏仁核，Lindquist 等(2012)的元分析结果表明，杏仁核并不特异于恐惧，而其激活增强主要是由新异刺激、非预期的刺激所引起的(Schwartz et al., 2003; Blackford et al., 2010)，同时，研究表明，杏仁核的激活能促进 LC 的强直性激活水平(McCall et al., 2015)。

综上不难看出，SN 网络、LC、BF 以及 VTA 这些与非预期性有关的脑区几乎都是唤醒系统的重要组成部分，另外，杏仁核也与唤醒系统具有密切连接。因此，非预期性与唤醒所涉及的脑机制具有大量的重叠。

在此基础上，值得注意的是，非预期的刺激也会激活与注意相关的脑区，例如，当新异刺激和非预期刺激输入时，与注意相关的外侧前额叶(Miyata, 2019)、顶叶(Miyata, 2019)、AI (von Düring et al., 2019)、ACC (Hayden et al., 2011)、BF (Zhang et al., 2019)、LC (Benarroch, 2018)等区域被显著激活。这可能是因为当面对非预期刺激时，个体需要调动注意等认知资源以快速应对环境变化(Benarroch, 2018)。而唤醒可能在这个过程中起着关键作用。Coull (1998)认为注意指的是神经资源的分配，唤醒则指的是有机体调动资源的一种准备状态(Posner et al., 2009)，故在非预期刺激出

表 1　中英文全称对照表

英文缩写	中英文全称	英文缩写	中英文全称
SAM	The Self-Assessment Manikin，自我评估模型	TS	Tail of striatum，尾部纹状体
ANS	Autonomic nervous system，自主神经系统	TMN	Tuberomammillary nucleus，下丘脑结节乳头核
SNS	Sympathetic nervous system，交感神经系统	PPT	Pedunculopontine，脑桥脚
PNS	Parasympathetic nervous system，副交感神经系统	LDT	Laterodorsal Tegmental Nuclei，外侧被盖核
HR	Heart rate，心率	PB	Parabrachial，臂膀核
SCL	Skin conductance level，皮肤电导水平	POA	Preoptic area，下丘脑视前区
PDR	Pupillary dilation response，瞳孔扩张反应	LH	Lateral hypothalamus，外侧下丘脑
HRV	Heart rate variability，心率变异性	SNr	substantia nigra pars reticulata，黑质下网状部分
BF	Basal Forebrain，基底前脑	PAG	periaqueductal gray，中脑导水管周围黑质
LC	locus coeruleus，蓝斑	MCH	Melanin concentrating hormone，黑色素浓缩激素
NE	Norepinephrine，去甲肾上腺素	DMN	Default mode network，默认模式网络
DRN	Dorsal raphe nuclei，中缝背核	SN	Salience network，突显网络
5-HT	5-hydroxytryptamine，五-羟色胺	AI	Anterior insula，前脑岛
VTA	Ventral tegmental area，腹侧被盖区	ACC	anterior cingulate cortex，前扣带回
DA	Dopaminergic，多巴胺		

现后的注意增强可能是通过改变唤醒水平来完成的。此外，非预期刺激所激活的注意网络大多是重要唤醒系统的一部分，例如 AI、ACC、BF、LC 等。其中，LC 系统的运作机制对于理解唤醒的变化在注意中的作用就是一个很好的例子。LC 有强直性(Tonic firing)和位相型(Phasic firing)两种激活模式。强直性激活水平与唤醒水平和机体的准备状态呈正相关，当外界输入意外刺激时，LC 会进行强直性放电，从而通过提高唤醒以促进个体对意外刺激的注意(Benarroch, 2018)。但当个体在处理任务时，并不需要对所有的意外刺激做出反应，此时 LC 的位相型放电模式就在其中发挥作用，其能够过滤无关刺激，防止个体分心，促使个体将注意力集中在任务中(Benarroch, 2018)。在一定程度上，LC 强直性激活水平的提高能够有助于其将工作模式切换到位相型，使得个体集中注意力在当前任务中，但当唤醒水平或者强直性激活水平超过某个临界值，就无法再切换到位相型工作模式，这时个体就会被意外刺激所分走注意力，这便导致了觉醒水平与任务水平呈倒 U 型关系的著名定律(Aston-Jones & Cohen, 2005)。由此可以看出，当外界输入非预期刺激时，注意资源的调动是通过唤醒水平的变化来完成的，且意外刺激所诱发的觉醒程度还决定了被调动起来的注意资源是集中在当前任务中还是非预期刺激上。

4.5　小结

综上所述，脑干中的一些区域(PPT、LDT、PB、LC、DRN、TS 以及 VTA，见表 1)和下丘脑结节乳头核(TMN)能直接投射到下丘脑形成腹侧通路或者投射到丘脑形成背侧通路，从而促进唤醒，另外，BF 也能够直接投射到丘脑的背侧通路。POA、LH、SNr 以及 PAG 中的 GABA 能神经元能够抑制唤醒回路，达到促进睡眠的效果。唤醒系统与编码非预期性信号的脑区几乎重叠(例如，SN、BF、VTA、LC)。此外，非预期刺激也能够激活注意网络，而唤醒可能在这个过程中扮演着关键作用。

5　总结与未来研究方向

唤醒是情绪的核心特征，经常作为情绪的重要指标被研究者广泛使用。本文对“唤醒”这一核心概念的提出与发展进行了回顾，并对唤醒度与情绪强度之间的区别与联系进行梳理与讨论。在此基础上，采用“刺激定义情绪”的思想对唤醒进行探析，厘清了唤醒的心理机制，并论述了唤醒加工有关的神经环路和生物化学基础。另外，就目前与唤醒相关的研究现状而言，可从中发现以

下几个未来研究方向。

5.1 心理唤醒与生理唤醒的关系研究

Xia 等(2017)的研究结果表明，对情绪图片更大的皮肤电反应和 SN 网络内部更强的功能连接性独立地预测了唤醒体验。但先前研究表明，自主神经系统也受到中枢神经系统的控制，例如，控制瞳孔扩张的通路始于下丘脑和蓝斑，连接虹膜扩张肌，杏仁核的激活水平与皮肤电反应呈正相关(Joshi et al., 2016; Mathôt, 2018)，故生理唤醒涉及一个较为复杂的系统，其对心理唤醒的影响效应可能会随着被试、技术手段、选取的自主神经系统的指标和中枢神经系统的感兴趣区域的不同而有所不同。未来研究可进一步采用 FMRI、眼动、皮肤电等技术手段来探究生理唤醒对心理唤醒的影响效应，有助于唤醒的生理基础和相关加工机制的进一步厘清。

5.2 唤醒度的测量方法有待丰富和优化

唤醒作为情绪的重要维度，应用领域十分广泛。然而，目前大多仅仅使用自我报告或者自主神经中的一种来测量唤醒。但是单个模态的数据并不能全面准确地衡量唤醒。未来研究可以使用一种多模态数据融合的方法，通过对自主报告、皮肤电、瞳孔、心率等数据以及中枢神经系统生理信号进行特征融合和决策融合等融合方法从而利用各个不同模态的互补性来做出更稳健的决策(Koelstra et al., 2012)。

5.3 评估人类临床精神疾病的唤醒特征

精神病理学干预的灵感长期以来都是源自于离散情绪理论(Wang et al., 2018; Gu et al., 2019)，然而，从情绪维度理论的唤醒维度出发或许能为人类精神疾病的探究与干预提供新思路，尤其是在面对抑郁障碍和焦虑障碍同时发生、双相情绪障碍和焦虑障碍同时发生等精神共病的问题时。例如，Posner 等(2005)认为，出现焦虑和抑郁障碍共病的原因可能是因为患者对于唤醒维度的分化性较差，即丧失了区分类似效价的情绪(如悲伤、焦虑、羞耻、抑郁)的能力, Eban-Rothschild 等(2016)认为，人类精神疾病中发现的许多共病病理都是由唤醒机制的不稳定引起的。未来研究可对人类临床精神疾病的唤醒特征进行评估。

5.4 进一步探讨唤醒度与情绪强度之间的关系

先前已有研究表明了效价和唤醒是情绪的两个主要预测因子(Jackson et al., 2019)，二者共同影响情绪，情绪的强度可在情绪维度的坐标中被表示为效价和唤醒两向量的矢量相加。但二者是如何影响各种情绪的强度仍不清楚。具体来说，效价和唤醒对情绪的贡献比例可用表征该种情绪强度的向量与横坐标的夹角来表示，而恐惧和厌恶均为负效价高唤醒情绪，二者的区别可能在于效价和唤醒对它们的贡献比例有所不同。另外，Taverner 等(2021)的研究提出了使用坐标中的区间代替一个点表征一种情绪，有助于探讨每种情绪所对应的效价和唤醒的范围以及各种情绪之间的重叠程度。未来研究可进一步探讨各种情绪在坐标中的区间、夹角、强度等问题，对该类问题的明确有助于进一步厘清唤醒度与情绪强度的关系以及推动有关情绪强度的研究。

参考文献

白露，马慧，黄宇霞，罗跃嘉. (2005). 中国情绪图片系统的编制——在 46 名中国大学生中的试用. *中国心理卫生杂志*, (11), 4–7.

乐国安，董颖红. (2013). 情绪的基本结构：争论、应用及其前瞻. *南开学报(哲学社会科学版)*, (1), 140–150.

王福顺，成敬，张艳萍，姜长青. (2018). *情绪心理学*. 北京：人民卫生出版社.

王慧颖，董昕文，李秀丽，李勇辉. (2011). 高唤醒对创伤后应激障碍形成发展的影响及其神经机制. *心理科学进展*, *19*(11), 1651–1657.

Adamantidis, A. R., Zhang, F., Aravanis, A. M., Deisseroth, K., & de Lecea, L. (2007). Neural substrates of awakening probed with optogenetic control of hypocretin neurons. *Nature*, *450*(7168), 420–424.

Akhtar, S., Ghosal, D., Ekbal, A., Bhattacharyya, P., & Kurohashi, S. (2019). All-in-One: Emotion, sentiment and intensity prediction using a multi-task ensemble framework. *IEEE Transactions on Affective Computing*, (99), 1–1.

Alamia, A., VanRullen, R., Pasqualotto, E., Mouraux, A., & Zenon, A. (2019). Pupil-linked arousal responds to unconscious surprisal. *The Journal of Neuroscience*, *39*(27), 5369–5376.

Anaclet, C., Pedersen, N. P., Ferrari, L. L., Venner, A., Bass, C. E., Arrigoni, E., & Fuller, P. M. (2015). Basal forebrain control of wakefulness and cortical rhythms. *Nature Communications*, *6*(1), 8744.

Aston-Jones, G., & Cohen, J. D. (2005). An integrative theory of locus coeruleus-norepinephrine function: Adaptive gain and optimal performance. *Annual Review of Neuroscience*, *28*(1), 403–450.

Bär, K.-J., de la Cruz, F., Schumann, A., Koehler, S., Sauer,

H., Critchley, H., & Wagner, G. (2016). Functional connectivity and network analysis of midbrain and brainstem nuclei. *NeuroImage, 134*, 53–63.

Barrett, L. F., & Bliss-Moreau, E. (2009). Chapter 4 affect as a psychological primitive. *Advances in Experimental Social Psychology*, *41,* 167–218.

Barrett, L. F., Mesquita, B., Ochsner, K. N., & Gross, J. J. (2007). The experience of emotion. *Annual Review of Psychology, 58*(1), 373–403.

Barrett, L. F., & Russell, J. A. (1999). The structure of current affect: Controversies and emerging consensus. *Current Directions in Psychological Science, 8*(1), 10–14.

Barry, R. J. (2004). Stimulus significance effects in habituation of the phasic and tonic orienting reflex. *Integrative Physiological & Behavioral Science, 39*(3), 166–179.

Bellato, A., Arora, I., Hollis, C., & Groom, M. J. (2020). Is autonomic nervous system function atypical in attention deficit hyperactivity disorder (ADHD)? A systematic review of the evidence. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews, 108*, 182–206.

Benarroch, E. E. (2018). Locus coeruleus. *Cell and Tissue Research, 373*(1), 221–232.

Blackford, J. U., Buckholtz, J. W., Avery, S. N., & Zald, D. H. (2010). A unique role for the human amygdala in novelty detection. *NeuroImage, 50*(3), 1188–1193.

Bradley, M. M. (2009). Natural selective attention: Orienting and emotion. *Psychophysiology, 46*(1), 1–11.

Bradley, M. M., & Lang, P. J. (1994). Measuring emotion: The self-assessment manikin and the semantic differential. *Journal of Behavior Therapy and Experimental Psychiatry, 25*(1), 49–59.

Bradley, M. M., & Lang, P. J. (2017). International affective picture system. In V. Zeigler-Hill and T. Shackelford (Ed.), The *Encyclopedia of Personality and Individual Differences* (pp.1−4). London, U.K.: Springer.

Bradley, M. M., Miccoli, L., Escrig, M. A., & Lang, P. J. (2010). The pupil as a measure of emotional arousal and autonomic activation. *Psychophysiology, 45*(4), 602-607.

Buzsaki, G., Bickford, R., Ponomareff, G., Thal, L., Mandel, R., & Gage, F. (1988). Nucleus basalis and thalamic control of neocortical activity in the freely moving rat. *The Journal of Neuroscience, 8*(11), 4007–4026.

Cannon, W. B. (1914). The emergency function of the adrenal medulla in pain and the major emotions. *American Journal of Physiology, 33*(2), 356–372.

Carter, C. S., Braver, T. S., Barch, D. M., Botvinick, M. M., Noll, D., & Cohen, J. D. (1998). Anterior cingulate cortex, error detection, and the online monitoring of performance. *Science, 280*(5364), 747–749.

Cavanagh, J. F., Wiecki, T. V., Kochar, A., & Frank, M. J. (2014). Eye tracking and pupillometry are indicators of dissociable latent decision processes. *Journal of Experimental Psychology: General, 143*(4), 1476–1488.

Cazettes, F., Reato, D., Morais, J. P., Renart, A., & Mainen, Z. F. (2021). Phasic activation of dorsal raphe serotonergic neurons increases pupil size. *Current Biology, 31*(1), 192–197.

Coull, J. T. (1998). Neural correlates of attention and arousal: Insights from electrophysiology, functional neuroimaging and psychopharmacology. *Progress in Neurobiology, 55*(4), 343–361.

de Gee, J. W., Correa, C. M. C., Weaver, M., Donner, T. H., & van Gaal, S. (2021). Pupil dilation and the slow wave ERP reflect surprise about choice outcome resulting from intrinsic variability in decision confidence. *Cerebral Cortex, 31*, 3565–3578.

de Gee, J. W., Knapen, T., & Donner, T. H. (2014). Decision-related pupil dilation reflects upcoming choice and individual bias. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 111*(5), 618–625.

Duffy, E. (1957). The psychological significance of the concept of "arousal" or "activation." *Psychological Review, 64*(5), 265–275.

Eban-Rothschild, A., Rothschild, G., Giardino, W. J., Jones, J. R., & de Lecea, L. (2016). VTA dopaminergic neurons regulate ethologically relevant sleep–wake behaviors. *Nature Neuroscience, 19*(10), 1356–1366.

Ekman, P. (1992). An argument for basic emotions. *Cognition and Emotion, 6*(3–4), 169–200.

Espuny, J., Jiménez-Ortega, L., Casado, P., Fondevila, S., Muñoz, F., Hernández-Gutiérrez, D., & Martín-Loeches, M. (2018). Event-related brain potential correlates of words' emotional valence irrespective of arousal and type of task. *Neuroscience Letters, 670*, 83–88.

Gabitov, E., Lungu, O., Albouy, G., & Doyon, J. (2020). Movement errors during skilled motor performance engage distinct prediction error mechanisms. *Communications Biology, 3*(1), 763.

Gong, H., McGinty, D., Guzman-Marin, R., Chew, K.-T., Stewart, D., & Szymusiak, R. (2004). Activation of c- fos in GABAergic neurones in the preoptic area during sleep and in response to sleep deprivation: Preoptic GABAergic neurones and sleep. *The Journal of Physiology, 556*(3), 935–946.

Greco, A., Valenza, G., Citi, L., & Scilingo, E. P. (2017). Arousal and valence recognition of affective sounds based on electrodermal activity. *IEEE Sensors Journal, 17*(3), 716–725.

Gu, S., Wang, F., Patel, N. P., Bourgeois, J. A., & Huang, J.

H. (2019). A model for basic emotions using observations of behavior in drosophila. *Frontiers in Psychology, 10*, 781.

Hadinejad, A., Moyle, B. D., Scott, N., & Kralj, A. (2019). Emotional responses to tourism advertisements: The application of FaceReader^{TM}. *Tourism Recreation Research, 44*(1), 131–135.

Hayden, B. Y., Heilbronner, S. R., Pearson, J. M., & Platt, M. L. (2011). Surprise signals in anterior cingulate cortex: Neuronal encoding of unsigned reward prediction errors driving adjustment in behavior. *Journal of Neuroscience, 31*(11), 4178–4187.

Iordan, A. D., & Dolcos, F. (2015). Brain activity and network interactions linked to valence-related differences in the impact of emotional distraction. *Cerebral Cortex, 27*(1), 731–749.

Jackson, I., & Sirois, S. (2009). Infant cognition: Going full factorial with pupil dilation. *Developmental Science, 12*(4), 670–679.

Jackson, J. C., Watts, J., Henry, T. R., List, J.-M., Forkel, R., Mucha, P. J., Greenhill, S. J., Gray, R. D., & Lindquist, K. A. (2019). Emotion semantics show both cultural variation and universal structure. *Science, 366*(6472), 1517–1522.

Joshi, S., Li, Y., Kalwani, R. M., & Gold, J. I. (2016). Relationships between pupil diameter and neuronal activity in the locus coeruleus, colliculi, and cingulate cortex. *Neuron, 89*(1), 221–234.

Kamp, S.-M., & Donchin, E. (2015). ERP and pupil responses to deviance in an oddball paradigm: ERP and pupil responses in an oddball paradigm. *Psychophysiology, 52*(4), 460–471.

Kinney, L., & O'Hare, D. (2020). Responding to an unexpected in-flight event: Physiological arousal, information processing, and performance. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society, 62*(5), 737–750.

Koelstra, S., Muhl, C., Soleymani, M., Lee, J. K., Yazdani, A., Ebrahimi, T., Pun, T., Nijholt, A., & Patras, I. (2012). DEAP: A database for emotion analysis ;using physiological signals. *IEEE Transactions on Affective Computing, 3*(1), 18–31.

Koenigs, M., Holliday, J., Solomon, J., & Grafman, J. (2010). Left dorsomedial frontal brain damage is associated with insomnia. *Journal of Neuroscience, 30*(47), 16041–16043.

Konadhode, R. R., Pelluru, D., Blanco-Centurion, C., Zayachkivsky, A., Liu, M., Uhde, T., Glen, W. B., van den Pol, A. N., Mulholland, P. J., & Shiromani, P. J. (2013). Optogenetic stimulation of MCH neurons increases sleep. *Journal of Neuroscience, 33*(25), 10257–10263.

Kuppens, P., Tuerlinckx, F., Yik, M., Koval, P., Coosemans, J., Zeng, K. J., & Russell, J. A. (2017). The relation between valence and arousal in subjective experience varies with personality and culture: Relation of valence to arousal. *Journal of Personality, 85*(4), 530–542.

Lacey, J. I. (1956). The evaluation of autonomic responses: Toward a general solution. *Annals of the New York Academy of Sciences, 67*(5), 125–163.

Lang, P. J., Bradley, M. M., Fitzsimmons, J. R., Cuthbert, B. N., Scott, J. D., Moulder, B., & Nangia, V. (1998). Emotional arousal and activation of the visual cortex: An fMRI analysis. *Psychophysiology, 35*(2), 199–210.

Lavín, C., San Martín, R., & Rosales Jubal, E. (2014). Pupil dilation signals uncertainty and surprise in a learning gambling task. *Frontiers in Behavioral Neuroscience, 7*, 1–8.

Lazarus, R. S. (1999). *Stress and emotion*: *A new synthesis* (p. 342). NewYork: Springer.

Lee, Y.-J. G., Kim, S., Kim, N., Choi, J.-W., Park, J., Kim, S. J., Gwak, A. R., & Lee, Y. J. (2018). Changes in subcortical resting-state functional connectivity in patients with psychophysiological insomnia after cognitive–behavioral therapy. *NeuroImage: Clinical, 17*, 115–123.

Levy, B. (2013). Autonomic nervous system arousal and cognitive functioning in bipolar disorder: Cognitive functioning in bipolar disorder. *Bipolar Disorders, 15*(1), 70–79.

Lévy, C. M., MacRae, A., & Köster, E. P. (2006). Perceived stimulus complexity and food preference development. *Acta Psychologica, 123*(3), 394–413.

Liao, H.-I., Yoneya, M., Kidani, S., Kashino, M., & Furukawa, S. (2016). Human pupillary dilation response to deviant auditory stimuli: Effects of stimulus properties and voluntary attention. *Frontiers in Neuroscience, 10*(89), 43.

Lindquist, K. A., Siegel, E. H., Quigley, K. S., & Barrett, L. F. (2013). The hundred-year emotion war: Are emotions natural kinds or psychological constructions? Comment on Lench, Flores, and Bench (2011). *Psychological Bulletin, 139*(1), 255–263.

Lindquist, K. A., Wager, T. D., Kober, H., Bliss-Moreau, E., & Barrett, L. F. (2012). The brain basis of emotion: A meta-analytic review. *Behavioral and Brain Sciences, 35*(3), 121–143.

Liu, D., & Dan, Y. (2019). A motor theory of sleep-wake control: Arousal-action circuit. *Annual Review of Neuroscience, 42*(1), 27–46.

Maier, M. E., Ernst, B., & Steinhauser, M. (2019). Error-related pupil dilation is sensitive to the evaluation of different error types. *Biological Psychology, 141*, 25–34.

Mäki-Marttunen, V., Andreassen, O. A., & Espeseth, T. (2020). The role of norepinephrine in the pathophysiology of schizophrenia. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews, 118*, 298–314.

Mathôt, S. (2018). Pupillometry: Psychology, physiology, and function. *Journal of Cognition, 1*(1), 16.

McCall, J. G., Al-Hasani, R., Siuda, E. R., Hong, D. Y., Norris, A. J., Ford, C. P., & Bruchas, M. R. (2015). CRH engagement of the locus coeruleus noradrenergic system mediates stress-induced anxiety. *Neuron, 87*(3), 605–620.

McGinty, D. J., & Harper, R. M. (1976). Dorsal raphe neurons: Depression of firing during sleep in cats. *Brain Research, 101*(3), 569–575.

Menegas, W., Akiti, K., Amo, R., Uchida, N., & Watabe-Uchida, M. (2018). Dopamine neurons projecting to the posterior striatum reinforce avoidance of threatening stimuli. *Nature Neuroscience, 21*(10), 1421–1430.

Menegas, W., Babayan, B. M., Uchida, N., & Watabe-Uchida, M. (2017). Opposite initialization to novel cues in dopamine signaling in ventral and posterior striatum in mice. *ELife, 6*, e21886.

Miyata, J. (2019). Toward integrated understanding of salience in psychosis. *Neurobiology of Disease, 131*, 104414.

Murphy, P. R., van Moort, M. L., & Nieuwenhuis, S. (2016). The pupillary orienting response predicts adaptive behavioral adjustment after errors. *PLoS One, 11*(3), e0151763.

Nauta, W. J. H. (1946). Hypothalamic regulation of sleep in rats. An experimental study. *Journal of Neurophysiology, 9*(4), 285–316.

Olbrich, S., Tränkner, A., Surova, G., Gevirtz, R., Gordon, E., Hegerl, U., & Arns, M. (2016). CNS-and ANS-arousal predict response to antidepressant medication: Findings from the randomized iSPOT-D study. *Journal of Psychiatric Research, 73*, 108–115.

Pace-Schott, E. F., Amole, M. C., Aue, T., Balconi, M., Bylsma, L. M., Critchley, H., … VanElzakker, M. B. (2019). Physiological feelings. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews, 103*, 267–304.

Peters, A., McEwen, B. S., & Friston, K. (2017). Uncertainty and stress: Why it causes diseases and how it is mastered by the brain. *Progress in Neurobiology, 156*, 164–188.

Picchioni, D., Pixa, M. L., Fukunaga, M., Carr, W. S., Horovitz, S. G., Braun, A. R., & Duyn, J. H. (2014). Decreased connectivity between the thalamus and the neocortex during human nonrapid eye movement sleep. *Sleep, 37*(2), 387–397.

Posner, J., Russell, J. A., Gerber, A., Gorman, D., Colibazzi, T., Yu, S., Wang, Z., Kangarlu, A., Zhu, H., & Peterson, B. S. (2009). The neurophysiological bases of emotion: An fMRI study of the affective circumplex using emotion-denoting words. *Human Brain Mapping, 30*(3), 883–895.

Posner, J., Russell, J. A., & Peterson, B. S. (2005). The circumplex model of affect: An integrative approach to affective neuroscience, cognitive development, and psychopathology. *Development and Psychopathology, 17*(03), 715−734.

Preoţiuc-Pietro, D., Schwartz, H. A., Park, G., Eichstaedt, J., Kern, M., Ungar, L., & Shulman, E. (2016, June). Modelling valence and arousal in Facebook posts. In *Proceedings of the 7th Workshop on Computational Approaches to Subjectivity, Sentiment and Social Media Analysis* (pp.9–15). Symposium conducted at the meeting of North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies, San Diego, California, USA.

Preuschoff, K., Hart, B. M., & Einhauser, M. (2011). Pupil dilation signals surprise: Evidence for noradrenaline's role in decision making. *Frontiers in Neuroscience, 5*, 115.

Razmjou, S. (1996). Mental workload in heat: Toward a framework for analyses of stress states. *Aviation, space, and Environmental Medicine, 67*(6), 530–538.

Regen, W., Kyle, S. D., Nissen, C., Feige, B., Baglioni, C., Hennig, J., Riemann, D., & Spiegelhalder, K. (2016). Objective sleep disturbances are associated with greater waking resting-state connectivity between the retrosplenial cortex/hippocampus and various nodes of the default mode network. *Journal of Psychiatry & Neuroscience, 41*(5), 295–303.

Ross, J. A., & van Bockstaele, E. J. (2021). The locus coeruleus-norepinephrine system in stress and arousal: Unraveling historical, current, and future perspectives. *Frontiers in Psychiatry, 11*, 601519.

Russell, J. (1980). A circumplex model of affect. *Journal of Personality and Social Psychology, 39*, 1161–1178.

Russell, J. A. (2003). Core affect and the psychological construction of emotion. *Psychological Review, 110*(1), 145–172.

Saper, C. B. (2002). The central autonomic nervous system: Conscious visceral perception and autonomic pattern generation. *Annual Review of Neuroscience, 25*(1), 433–469.

Satpute, A. B., Kragel, P. A., Barrett, L. F., Wager, T. D., & Bianciardi, M. (2019). Deconstructing arousal into wakeful, autonomic and affective varieties. *Neuroscience Letters, 693*, 19–28.

Scammell, T. E., Arrigoni, E., & Lipton, J. O. (2017). Neural circuitry of wakefulness and sleep. *Neuron, 93*(4), 747–765.

Schiel, J. E., Holub, F., Petri, R., Leerssen, J., Tamm, S., Tahmasian, M., Riemann, D., & Spiegelhalder, K. (2020). Affect and arousal in insomnia: Through a lens of neuroimaging studies. *Current Psychiatry Reports, 22*(9), 44.

Schlosberg, H. (1952). The description of facial expressions in terms of two dimensions. *Journal of Experimental Psychology,*

44(4), 229–237.

Schlosberg, H. (1954). Three dimensions of emotion. *Psychological Review, 61*(2), 81–88.

Schultz, W., Dayan, P., & Montague, P. R. (1997). A neural substrate of prediction and reward. *Science, 275*(5306), 1593–1599.

Schwartz, C. E., Wright, C. I., Shin, L. M., Kagan, J., Whalen, P. J., McMullin, K. G., & Rauch, S. L. (2003). Differential amygdalar response to novel versus newly familiar neutral faces: A functional MRI probe developed for studying inhibited temperament. *Biological Psychiatry, 53*(10), 854–862.

Sekoguchi, T., Sakai, Y., & Yanagisawa, H. (2019). *Mathematical model of emotional habituation to novelty: Modeling with bayesian update and information theory.* Paper presented at the meeting of 2019 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (pp.1115–1120), Bari, Italy.

Shenhav, A., Musslick, S., Lieder, F., Kool, W., Griffiths, T. L., Cohen, J. D., & Botvinick, M. M. (2017). Toward a rational and mechanistic account of mental effort. *Annual Review of Neuroscience, 40*(1), 99–124.

Siegel, J. (2004). Brain mechanisms that control sleep and waking. *Die Naturwissenschaften, 91*(8), 355–365.

Steriade, M. (1996). arousal—revisiting the reticular activating system. *Science, 272*(5259), 225.

Stitt, I., Zhou, Z. C., Radtke-Schuller, S., & Fröhlich, F. (2018). Arousal dependent modulation of thalamo-cortical functional interaction. *Nature Communications, 9*(1), 2455.

Tagliazucchi, E., von Wegner, F., Morzelewski, A., Brodbeck, V., Jahnke, K., & Laufs, H. (2013). Breakdown of long-range temporal dependence in default mode and attention networks during deep sleep. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 110*(38), 15419–15424.

Taverner, J., Vivancos, E., & Botti, V. (2021). A multidimensional culturally adapted representation of emotions for affective computational simulation and recognition. *IEEE Transactions on Affective Computing*, (99), 1–1.

Tsunematsu, T., Ueno, T., Tabuchi, S., Inutsuka, A., Tanaka, K. F., Hasuwa, H., Kilduff, T. S., Terao, A., & Yamanaka, A. (2014). Optogenetic manipulation of activity and temporally controlled cell-specific ablation reveal a role for MCH neurons in sleep/wake regulation. *Journal of Neuroscience, 34*(20), 6896–6909.

Turkington, G. D., Lawrence, T., & Stuart, W. (2019). Linguistic analysis of the valence, arousal and dominance of auditory hallucinations and internal thoughts in schizophrenia: Implications for psychoeducation and CBT. *Cogent Psychology, 6*(1), 1703463.

Ueda, K., Sekoguchi, T., & Yanagisawa, H. (2021). How predictability affects habituation to novelty. *PloS One, 16*(6), e0237278.

Urai, A. E., Braun, A., & Donner, T. H. (2017). Pupil-linked arousal is driven by decision uncertainty and alters serial choice bias. *Nature Communications, 8*(1), 14637.

van Slooten, J. C., Jahfari, S., Knapen, T., & Theeuwes, J. (2018). How pupil responses track value-based decision-making during and after reinforcement learning. *PLOS Computational Biology, 14*(11), e1006632.

Vetter, N. C., Drauschke, M., Thieme, J., & Altgassen, M. (2018). Adolescent basic facial emotion recognition is not influenced by puberty or own-age bias. *Frontiers in Psychology, 9*, 956.

Visalli, A., Capizzi, M., Ambrosini, E., Mazzonetto, I., & Vallesi, A. (2019). Bayesian modeling of temporal expectations in the human brain. *NeuroImage, 202*, 116097.

von Düring, F., Ristow, I., Li, M., Denzel, D., Colic, L., Demenescu, L. R., Li, S., Borchardt, V., Liebe, T., Vogel, M., & Walter, M. (2019). Glutamate in salience network predicts BOLD response in default mode network during salience processing. *Frontiers in Behavioral Neuroscience, 13*, 232.

Wang, F., Pan, F., Shapiro, L. A., & Huang, J. H. (2018). Stress induced neuroplasticity and mental disorders 2018. *Neural Plasticity, 2018*, 5382537.

Wang, F., Yang, J., Pan, F., Ho, R. C., & Huang, J. H. (2020). Editorial: Neurotransmitters and emotions. *Frontiers in Psychology, 11*, 21.

Wang, H.-L., & Morales, M. (2009). Pedunculopontine and laterodorsal tegmental nuclei contain distinct populations of cholinergic, glutamatergic and GABAergic neurons in the rat. *European Journal of Neuroscience, 29*(2), 340–358.

Wassing, R., Schalkwijk, F., Lakbila-Kamal, O., Ramautar, J. R., Stoffers, D., Mutsaerts, H. J. M. M., Talamini, L. M., & van Someren, E. J. W. (2019). Haunted by the past: Old emotions remain salient in insomnia disorder. *Brain, 142*(6), 1783–1796.

Weber, F., Hoang Do, J. P., Chung, S., Beier, K. T., Bikov, M., Saffari Doost, M., & Dan, Y. (2018). Regulation of REM and non-REM sleep by periaqueductal GABAergic neurons. *Nature Communications, 9*(1), 354.

Weible, A. P., Weiss, C., & Disterhoft, J. F. (2007). Connections of the caudal anterior cingulate cortex in rabbit: Neural circuitry participating in the acquisition of trace eyeblink conditioning. *Neuroscience, 145*(1), 288–302.

Weissman, D. G., Guyer, A. E., Ferrer, E., Robins, R. W., & Hastings, P. D. (2018). Adolescents' brain-autonomic coupling during emotion processing. *NeuroImage, 183*, 818–827.

Whalen, P., Kapp, B., & Pascoe, J. (1994). Neuronal activity within the nucleus basalis and conditioned neocortical electroencephalographic activation. *The Journal of Neuroscience, 14*(3), 1623–1633.

Wilson-Mendenhall, C. D., Barrett, L. F., & Barsalou, L. W. (2013). Neural evidence that human emotions share core affective properties. *Psychological Science, 24*(6), 947–956.

Wundt, W. M. (1897). *Outlines of psychology*. New York, NY: Thoemmes Continuum Press, 653.

Xia, C., Touroutoglou, A., Quigley, K. S., Feldman Barrett, L., & Dickerson, B. C. (2017). Salience network connectivity modulates skin conductance responses in predicting arousal experience. *Journal of Cognitive Neuroscience, 29*(5), 827–836.

Xu, M., Chung, S., Zhang, S., Zhong, P., Ma, C., Chang, W.-C., … Dan, Y. (2015). Basal forebrain circuit for sleep-wake control. *Nature Neuroscience, 18*(11), 1641–1647.

Yu, A. J., & Dayan, P. (2005). Uncertainty, neuromodulation, and attention. *Neuron, 46*(4), 681–692.

Zhang, K., Chen, C. D., & Monosov, I. E. (2019). Novelty, salience, and surprise timing are signaled by neurons in the basal forebrain. *Current Biology, 29*(1), 134-142.

Zhao, S., Chait, M., Dick, F., Dayan, P., Furukawa, S., & Liao, H.-I. (2019). Pupil-linked phasic arousal evoked by violation but not emergence of regularity within rapid sound sequences. *Nature Communications, 10*(1), 4030.

Zheng, Z., Gu, S., Lei, Y., Lu, S., Wang, W., Li, Y., & Wang, F. (2016). Safety needs mediate stressful events induced mental disorders. *Neural Plasticity, 2016*, 1–6.

Zukerman, G., Pinhas, M., Ben-Itzhak, E., & Fostick, L. (2019). Reduced electrophysiological habituation to novelty after trauma reflects heightened salience network detection. *Neuropsychologia, 134*, 107226.

An investigation into the definition of arousal and its cognitive neurophysiological basis

ZOU Di, LI Hong, WANG Fushun

(*Institute of Brain and Psychological Sciences, Sichuan Normal University, Chengdu* 610066, *China*)

Abstract: Arousal is a measurement of body’s wakefulness, reflecting the strengthened preparation for external stimulus input. Its level changes on the continuum from sleep to provocation, and has unique physiological mechanisms and neural circuits. As arousal is closely related to emotions, many researchers take arousal as a substitute for emotional intensity, but emotional intensity should be the vector addition of arousal and valence. Inspired by Lazarus’ argument that stimuli define emotions, this article explores the connotation and psychological mechanism of arousal. We hold that the emergency preparation for unexpected stimuli is the main function of arousal system, and anticipation and its related mechanisms are the major cognitive mechanisms of arousal. Other factors (stimulus attributes, individual differences, etc.) affects the number of resources that the individual needs to process the stimulus. Besides, the degree of individual expectations can be affected. As a result, these factors also affect the level of arousal. Future researchers may further promote basic and applied research on arousal from the aspects of the relationship between psychological arousal and physical arousal, the measurement method of arousal, the relationship between arousal and emotional intensity, and the characteristics of arousal in human clinical mental illness.

Key words: arousal, anticipation, cognitive mechanism, sleep, wakefulness, emotional intensity